



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERIA

SYLLABUS

PROYECTO CURRICULAR:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

NOMBRE DEL DOCENTE:

ESPACIO ACADÉMICO:

*TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS Y
SOBRETENSIONES*

Obligatorio () -- Básico () -- Complementario (X)
Electivo (X) -- Intrínsecas (X) -- Extrínsecas ()

CÓDIGO: 12800007

NUMERO DE ESTUDIANTES: 15

GRUPO:

NÚMERO DE CREDITOS: 4

TIPO DE CURSO: TEÓRICO PRACTICO TEO-PRAC

Alternativas metodológicas:

Clase Magistral (X), Seminario (X), Seminario – Taller (), Taller (X), Prácticas (X), Proyectos tutoriados (X), Otro: _____

HORARIO

DIA	HORAS	SALON

I. JUSTIFICACIÓN DEL ESPACIO ACADÉMICO (¿El Por Qué?)

Por lo general, los sistemas eléctricos son analizados es estado estable o casi-estable haciendo uso del concepto general de fasores. No obstante, dentro del funcionamiento habitual de estos sistemas también se encuentran acciones relacionadas con la apertura o cierre de interruptores, la ejecución de maniobras, la ocurrencia de fallas, la aparición de perturbaciones y el impacto directo o indirecto de rayos. Todas estas acciones generan transitorios electromagnéticos que son eventos de corta duración (desde nanosegundos hasta milisegundos), los cuales poseen una respuesta en frecuencia desde DC hasta MHz, producen a su vez sobretensiones y/o corrientes de gran magnitud y alteran la respuesta normal de los circuitos RLC que componen las redes eléctricas.

En este contexto, durante varias décadas el análisis de los transitorios electromagnéticos fue realizado bajo la óptica de la teoría de circuitos. Sin embargo, algunas particularidades de los sistemas eléctricos, como la respuesta no-lineal de las máquinas eléctricas (motores y transformadores) y la dependencia de la frecuencia por parte de las líneas de transporte de energía, han propiciado (desde mitad del siglo pasado) el estudio de este tipo de comportamientos haciendo uso de diversos enfoques de análisis que van más allá de la teoría convencional, incluyendo análisis en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o en espacios híbridos (transformada de Laplace, transformación de Fourier, etc.)

El análisis de transitorios electromagnéticos se ha convertido en un área de estudio relevante en ingeniería eléctrica para entender el desempeño y el funcionamiento de los sistemas eléctricos. Además, permite determinar los requerimientos de potencia de los componentes del sistema, explica las fallas de los equipos y facilita la prueba de los dispositivos de protección. Este curso hace énfasis en el estudio, análisis y simulación de transitorios en sistemas eléctricos de media, alta y extra-alta tensión (sistemas de distribución y de potencia). Para este fin, es necesario seguir una metodología donde se incluya la mayor cantidad de información del sistema (o red bajo estudio), se identifique y/o caracterice el evento transitorio, se implementen modelos (matemáticos y circuitales) de dicho sistema y se validen estos modelos con ayuda de herramientas de simulación que permitan evaluar la respuesta de los elementos que integran el sistema en estudio ante la presencia de transitorios electromagnéticos (análisis particular y/o general).

Conocimientos Previos

Ecuaciones diferenciales, análisis de circuitos, campos electromagnéticos, análisis de fallas en sistemas eléctricos, máquinas eléctricas, subestaciones eléctricas, teoría de alta tensión, sistemas de potencia.

II. PROGRAMACIÓN DEL CONTENIDO

OBJETIVOS

• OBJETIVO GENERAL

Analizar las causas y efectos de los transitorios electromagnéticos y sobretensiones que se originan en los sistemas eléctricos de media, alta y extra-alta tensión (sistemas de distribución y de potencia).

• OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diferenciar los transitorios electromagnéticos a partir de su origen y sus características (temporales y de magnitud).
- Identificar las características de las sobretensiones y los parámetros más importantes de los rayos (en Colombia y el mundo).
- Revisar los fundamentos y criterios necesarios para la adecuada protección contra sobretensiones.
- Implementar modelos (matemáticos y/o circuitales) del sistema, teniendo en cuenta el tipo y las características del transitorio electromagnético bajo estudio.
- Reconocer los efectos que provocan los transitorios electromagnéticos en las líneas, máquinas y demás equipos que hacen parte de las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, así como en instalaciones de media y alta tensión.
- Proponer soluciones para la mitigación de transitorios y sobretensiones en sistemas eléctricos a partir de la aplicación de diversas metodologías de análisis.

COMPETENCIAS DE FORMACIÓN

Básicas:

- Conocer las perturbaciones electromagnéticas más frecuentes en una red eléctrica, así como también su origen y los efectos más característicos en dispositivos, equipos y/o sistemas.
- Identificar las condiciones de riesgo y la manera en que se deben evitar para garantizar una mayor vida útil de equipos eléctricos
- Aplicar metodologías para analizar y mitigar el efecto de los transitorios generados por descargas atmosféricas y/o por maniobras en los sistemas eléctricos.

De contexto:

- Desarrollar habilidades para dar solución a problemas de carácter general.
- Desarrollar habilidades para protegerse y proteger otras personas frente a problemas que generen riesgo eléctrico.

- Formar a estudiantes como investigadores críticos e innovadores en el contexto nacional e internacional.
- Utilizar herramientas teóricas y prácticas para la plantear y desarrollar proyectos de investigación o desarrollo tecnológico en el contexto colombiano e internacional.
- Aplicar los principios de la ética y la moral en el comportamiento ciudadano y en el ejercicio profesional dentro de un contexto de responsabilidad, respeto y honestidad.
- Interactuar y trabajar de manera conjunta con otras personas para dar solución a un problema planteado.

PROGRAMA SINTÉTICO

1. Definiciones y marco de referencia
2. Coordinación de aislamiento y protección contra rayos
3. Modelización de elementos
4. Simulación para el análisis de transitorios electromagnéticos
5. Estudio de eventos típicos asociados a la aparición de transitorios y sobretensiones
6. PROYECTO FINAL

III. ESTRATEGIAS

Metodología Pedagógica y Didáctica:

La metodología para adelantar el curso es presencial e incluye varios componentes como son:

- Clases magistrales dictadas por el docente, durante los horarios programados por la coordinación del programa (maestría o pregrado), en el que se transmitan conocimientos y se activen los procesos cognitivos del estudiante. El material se entregará previamente para la participación por parte de los estudiantes.
- Talleres y estudio de casos. Estos serán investigados, discutidos y reflexionados por los estudiantes
- Resolución de ejercicios y problemas donde el estudiante ejercite, ensaye y ponga en práctica los conocimientos previos.
- Simulación, análisis y diseño.
- Prácticas demostrativas en los laboratorios de la Universidad.
- Aprendizaje orientado a proyectos. Esto permite a los estudiantes interactuar en situaciones concretas y significativas que estimulan el saber, el saber hacer y el saber ser, aplicando las habilidades y conocimientos adquiridos.

Tipo de Curso	Horas			Horas profesor/semana	Horas Estudiante/semana	Total horas Estudiante/semestre	Créditos
	TD	TC	TA	(TD + TC)	(TD + TC +TA)	X 16 semanas	
Presencial	3	1	8	4	12	192	4

- **Trabajo Presencial Directo (TD):** trabajo de aula con plenaria de todos los estudiantes.
- **Trabajo Mediado Cooperativo (TC):** Trabajo de tutoría del docente a pequeños grupos o de forma individual a los estudiantes.
- **Trabajo Autónomo (TA):** Trabajo del estudiante sin presencia del docente, que se puede realizar en distintas instancias: en grupos de trabajo o en forma individual, en casa o en biblioteca, laboratorio, etc.).

IV. RECURSOS

Medios y Ayudas

- Las sesiones teóricas serán desarrolladas a través de charlas y presentaciones, utilizando medios audiovisuales tales como video beam y demostraciones en el tablero.
- Las sesiones de trabajo serán complementadas con mesas de discusión, lecturas y revisión de documentos especializados.
- Como parte del proyecto se seleccionarán artículos de revistas indexadas A1, A2 y B según Publindex, que serán estudiados por grupos y discutidos posteriormente en clase.
- Los talleres se desarrollarán en las salas de informática en donde cuenta con programas especializados.
- Se realizarán un par de prácticas demostrativas en los laboratorios de máquinas eléctricas y alta tensión.

Bibliografía básica

Textos Guías:

- Martínez-Velasco J. A., Introduction to Electromagnetic Transient Analysis of Power Systems, Wiley Library, 2014.
- Martínez-Velasco J. A., Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. McGraw Hill, 2008
- Kuffel E., Zaengl W.S. Y Kuffel J. High voltage engineering: Fundamentals. Editorial Newnes, Norfolk, 2000.
- Peterson A., & Durgin G., Transient signals on transmission lines, Morgan and Claypool Publishers, 2008.
- Faria da Silva F., Leth C., Electromagnetic Transients in Power Cables, Springer, 2013.
- Q-Su C., Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings, IGI Global, 2012.
- Arrillaga J. & Watson N., Power Systems Electromagnetic Transients Simulation, IET Digital Library, 2002.
- Ramanujam R., Computational Electromagnetic Transients: Modeling, Solution Methods and Simulation, IK International Publishing House, 2014
- NTC 3328. Coordinación de aislamiento. Definiciones, principios y reglas
- NTC 4552. Protección contra rayos. Principios Generales.
- NTC 4591. Técnicas de ensayo de alta tensión. Definiciones generales y requisitos de ensayo.

Textos Complementarios:

- Krauss J., Electromagnetics, Ed. McGraw Hill, 1992.
- Kuffel E., Zaengl W.S. & Kuffel J., High voltage engineering: Fundamentals. Ed. Newnes, 2000.
- Naidu M.S, & Kamaraju, V., High Voltage Engineering, McGraw Hill, 2004
- Hileman A., Insulation Coordination for Power Systems. Ed. Marcel Dekker. New York, 1999.
- Schwab A.J., High voltage measurement technique.
- Siegert L., Alta Tensión y sistemas de Transmisión.
- Gallagher T.J, Permain A.J., High voltage measurement, testing and design.
- Sadiku M., Elementos de electromagnetismo. Oxford University Press. USA, 2000.

Revistas:

- IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility
- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
- IEEE Transactions on Power and Energy Systems (PES)

- IEEE Transactions on Power Systems
- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement
- High Voltage Engineering Journal

Direcciones de internet:

- Bases de datos: www.elsevier.com
www.sciencedirect.com
www.ieeexplore.ieee.org
- ATP/ EMTP users:
<http://eeug-test.hostingkunde.de/>
<https://www.atpdraw.net/>
<https://sites.google.com/site/atpcaue/el-atp-empt>
- ETH High Voltage Laboratory Journal: <http://www.eeh.ee.ethz.ch>
- Laboratorios de alta tensión: www.powerlabs.org/highvoltage.htm - www.teslasystems.com

V. ORGANIZACIÓN/ TIEMPOS

PROGRAMA SINTÉTICO	SEMANAS															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Definiciones y marco de referencia																
2. Coordinación de aislamiento y protección contra rayos																
3. Modelización de elementos																
4. Simulación para el análisis de transitorios electromagnéticos																
5. Estudio de eventos típicos asociados a la aparición de transitorios y sobretensiones																
6. PROYECTO FINAL																

1. Definiciones y marco de referencia

- Introducción
- Clasificación de los transitorios electromagnéticos (EMT)
- Sobretensiones: internas, externas, transitorias, normalizadas y no-normalizadas
- Relación entre transitorios, sobretensiones, descargas atmosféricas y maniobras
- Efecto de las sobretensiones en sistemas eléctricos
- Análisis de transitorios: aplicaciones, influencia de la frecuencia

2. Coordinación de aislamiento y protección contra rayos

- Normatividad nacional e internacional aplicable
- Niveles de protección y sistemas de protección contra rayos (SIPRA)
- Condiciones iniciales y componentes de la Coordinación de aislamiento y el SIPRA
- Blindaje y apantallamiento: sistemas de captación e interceptación, método electrogeométrico, de la esfera rodante, del ángulo de protección.
- Criterios generales para la coordinación de aislamiento: soportabilidad del aislamiento, BIL, BSL, factores de seguridad y selección de protecciones
- Aspectos complementarios para la coordinación de aislamiento en media y alta tensión.

TALLERES Y LABORATORIOS

3. Modelización de elementos

- Representación de fuentes de tensión y de corriente, AC, DC y tipo impulso
- Líneas, cables (aéreos y subterráneos) y haz de conductores
- Modelos con parámetros concentrados y distribuidos
- Transformadores y máquinas rotativas: modelos básicos y no-lineales (respuesta transitoria)
- Elementos de protección y control: interruptores, sensores, relés, compensadores, sistemas de control, aisladores, supresores de sobretensión, descargadores
- Estructuras y elementos asociados al soporte de líneas y cables
- Elementos de conexión a tierra: cable de guarda, sistema de puesta a tierra, conductores de equipotencialización, blindaje de conductores
- Dispositivos basados en electrónica de potencia

4. Simulación para el análisis de transitorios y sobretensiones

- Métodos de cálculo para el análisis transitorio, ondas viajeras y medios de propagación
- Herramientas de simulación: ATP/EMTP, Matlab, otros (capacidades, ventajas y desventajas)
- Selección adecuada del método de solución
- Selección de tiempos óptimos de simulación: duración total y constantes de tiempo (time-step)
- Simulación de transitorios en tiempo real (aproximaciones)

TALLERES Y LABORATORIOS

5. Estudio de eventos típicos asociados a la aparición de transitorios y sobretensiones

- Rayos (impacto directo e indirecto) y flameos
- Propagación de sobretensiones (temporales y transitorias)
- Transitorios básicos debido a circuitos RLC
- Fallas de corta duración en los sistemas eléctricos
- Energización y re-energización de bancos de condensadores
- Apertura y cierre de interruptores: ondas viajeras, efecto en cables, resonancias
- Energización de transformadores: corrientes de Inrush y otras resonancias

TALLERES Y LABORATORIOS

6. PROYECTO FINAL DEL CURSO: evaluación y mitigación de EMT (acercamiento a problemas reales)

- Análisis en estado estable: armónicos, hundimientos de tensión, fluctuaciones de tensión, ruido.
- Modelización del efecto corona en líneas de transmisión
- Estimación de riesgo en la falla del aislamiento
- Mitigación de sobretensiones
- Problemas relacionados con compatibilidad electromagnética

EXAMEN FINAL

PRACTICAS: Laboratorio de alta tensión (sede tecnológica) y salas de cómputo

- P1: sobretensiones, medición y respuesta de descargadores de sobretensión (LAT)
- P2: transitorios de alta corriente, medición y efecto sobre equipos sensibles (LAT)
- Adicionales

IV. EVALUACIÓN DEL ESPACIO ACADÉMICO

- Talleres: se realizarán durante todo el curso y están orientados al modelado de sistemas eléctricos, la evaluación de causas y efectos de transitorios y sobretensiones en sistemas eléctricos. Apoyados de revisión teórica y programas de simulación.
- Practicas: actividades de laboratorio y simulación para complementar los aspectos revisados en las sesiones teóricas.
- Proyecto final: será asignado a cada estudiante un trabajo final orientado hacia el análisis de diversas problemáticas que pueden aparecer sobre un sistema eléctrico en presencia de transitorios y

sobretensiones. Dicho trabajo incluye la definición del problema, el análisis de causas y efectos, la modelación electromagnética, dinámica o matemática a través de programas de simulación y la presentación de soluciones.

- Evaluación: realizada al final del curso permitirá determinar en qué medida se cumplieron las metas asociadas a los aprendizajes y competencias que deben adquirir los estudiantes.
- Defensa oral, tipo ponencia, de los talleres y el proyecto final desarrollado durante el curso.

	TIPO DE EVALUACIÓN	FECHA	PORCENTAJE
PRIMER CORTE	Talleres y discusiones		
	Prácticas (laboratorio y simulación)		
	Proyecto semestral: Avance		
SEGUNDO CORTE	Talleres y discusiones		
	Prácticas (laboratorio y simulación)		
	Proyecto final del curso		
EXAMEN FINAL	Examen final		
ASPECTOS POR EVALUAR DEL ESPACIO ACADÉMICO			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluación del aprendizaje y competencias de los estudiantes: individual, grupal, teórica, práctica, oral y escrita 2. Evaluación del desempeño docente 3. Autoevaluación y coevaluación del curso de forma oral entre estudiantes y docente 			

DATOS DEL PROFESOR	
Nombre	
Pregado	
Postgrado	
Correo Electrónico	

Diseñado por:

Prof. Herbert Enrique Rojas Cubides
 Prof. Francisco Santamaria Piedrahita
 Mayo de 2022

Revisado por:

Prof. Herbert Enrique Rojas Cubides
 Julio de 2023

ASISTENCIA PRIMER SESIÓN DEL CURSO – CONDICIONES INICIALES

FECHA:

APELLIDOS	NOMBRES	CÓDIGO (DI)	FIRMA
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			
11.			
12.			
13.			
14.			
15.			
16.			
17.			
18.			
19.			
20.			